

Número 0
Año 2026



cañadú

REVISTA CULTURAL

ARTE - HISTORIA - IDENTIDAD - CIENCIA



Fotograma de la película alemana

NO HUIR MÁS

Rodada en el puerto de Adra en 1954

CRÉDITOS

Revista cañadú

Año: 2026. Número 0

Edita: Ayuntamiento de Adra. Concejalía de Turismo, Playas, Cultura, Fiestas y Tradiciones, Protección Animal e Igualdad.

Director/Coordinador de la Revista: Antonio López Romero.

Consejo editorial: Manuel Cortés Pérez, Mari Paz Fernández Garrido, Elisa Isabel Fernández Fernández, José Sánchez Cazorla, Mariano Paracuellos Rodríguez, Paco Cuenca Gómez y Antonio López Romero.

Autores/autoras que colaboran en este número: José Sánchez Cazorla, Mariano Paracuellos Rodríguez et al, Francisco Javier Alcalá García, Francisco Cuenca Gómez, Víctor Rodríguez Segado, María Juana López Medina, Víctor Manuel Vargas Escudero, José Luis López Castro y Antonio López Romero.

Diseño, maquetación y tratamiento de imágenes: César Vaquero -SumiGraf

© **De la edición:** Ayuntamiento de Adra.

© **De los textos y fotos:** los/las autores/as

Foto de portada: Fotograma de la película No huyas más (1954)

Textos y fotos: el de sus autores

Licensed under: Creative Commons

ISSN: en asignación

Ayuntamiento de Adra.

Dirección: Prta del Mar, 3, 04770 Adra, Almería

Teléfono: 950 40 04 00

<https://canadu.adra.es> - revistacanadu@adra.es

Se permite la descarga de los artículos, pudiendo compartir los contenidos, siempre y cuando se referencien y citen (primer apellido autor/a seguido de las iniciales, fecha de publicación entre paréntesis, título artículo, Cañadú (Revista del Ayuntamiento de Adra) y URL donde se encuentra el artículo. Cañadú (Revista del Ayuntamiento de Adra) no se responsabiliza de las opiniones emitidas por los/as autores/as de la revista.



HIDROGEOLOGÍA URBANA DE LA LOCALIDAD DE ADRA

URBAN HYDROGEOLOGY OF ADRA TOWN

Francisco Javier Alcalá García

Departamento de Desertificación y Geo-Ecología, Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 04120 Almería, España

fjalcala@eeza.csic.es

ORCID: 0000-0002-8165-8669

Fuente de Marbella en el río Adra. El manantial más caudaloso de la provincia de Almería. Imagen <https://wastemagazine.es/fuentesdemarbella.htm>

Resumen: Naciones Unidas considera el aprovechamiento del agua urbana (superficial y subterránea) para usos auxiliares una medida adaptativa al Cambio Global en regiones con estrés hídrico. Este artículo conceptualiza el funcionamiento hidrogeológico y evalúa el recurso hídrico subterráneo urbano en la localidad de Adra, sur de España. Durante los últimos veinticinco años se ha realizado investigación científica multidisciplinar para evaluar el recurso hídrico subterráneo en la zona urbana y periurbana de Adra, permitiendo posicionar a esta localidad entre las que poseen

mejor definición hidrogeológica de España. Estas investigaciones han incluido: (1) estudios geológicos e hidrogeológicos con inventarios de datos, ensayos para la definición hidráulica de los acuíferos y cartografías de ultra detalle a escala 1:5.000; (2) ensayos geofísicos para definir la geometría de acuíferos y algunas características transitorias del agua subterránea, incluyendo diez secciones de Tomografía de Resistividad Eléctrica, trece secciones de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, ocho secciones de Radar de Penetración Terrestre, cuatro ensayos de Autocorrelación Espacial y docenas de

ensayos de Relación Espectral Horizontal-Vertical; y (3) análisis de numerosos parámetros fisicoquímicos, diferentes isótopos estables y radioisótopos, y algunos trazadores químicos para identificar tipos de aguas subterráneas, su origen, edad, dinámica y fuentes de contaminación. Estos hallazgos se han integrado para conceptualizar un funcionamiento hidrogeológico influenciado por la gestión urbana del agua y la agricultura de regadío en la zona periurbana norte. Se han definido diez formaciones hidrogeológicas, cuatro de ellas (basamento Paleozoico meteorizado, facies de litoral del Pleistoceno, coluviales del Holoceno y rellenos antrópicos) en el sector urbano norte escarpado (SUNE) aportan agua subterránea al sector urbano sur llano (SUSL), el cual pertenece a la Masa de Agua Subterránea “Delta del río Adra” (MASDRA). La recarga y descarga de agua subterránea desde el SUNE son del orden de $0,30 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ y $0,28 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, respectivamente, mientras que el almacenamiento neto de agua subterránea es del orden de $0,47 \text{ Mm}^3$. La alta renovabilidad del agua subterránea permitiría una explotación sostenible de este recurso para usos urbanos auxiliares, aliviando así la presión sobre la MASDRA.

Palabras clave: hidrogeología urbana; mapa hidrogeológico; geofísica; geometría de acuíferos; evaluación del recurso hídrico subterráneo; localidad de Adra; España

Abstract: The United Nations considers the use of urban water (surface and groundwater) for auxiliary purposes an adaptative measure to Global Change in water-stressed regions. This article conceptualizes the hydrogeological functioning and evaluates the urban groundwater resource in Adra town, southern Spain. Over the last twenty-five years, multidisciplinary scientific research has been conducted to evaluate the groundwater resource in the urban and peri-urban area of Adra, allowing this town to be positioned among those with the best hydrogeological definition in Spain. This research has included: (1) geological and hydrogeological studies with data inventories, surveys for the hydraulic definition of aquifers, and ultra-detailed mapping at a scale of 1:5,000; (2) geophysical surveys to define aquifer geometry and some transient groundwater features, including ten

Electrical Resistivity Tomography surveys, thirteen Multichannel Surface Wave Analysis surveys, eight Ground Penetrating Radar surveys, four Spatial Autocorrelation surveys, and dozens of Horizontal-Vertical Spectral Relationship surveys; and (3) analyses of numerous physicochemical parameters, different stable isotopes and radioisotopes, and some chemical tracers to identify groundwater types, their origin, age, dynamics, and sources of pollution. These findings have been integrated to conceptualize a hydrogeological functioning influenced by urban water management and irrigated agriculture in the northern peri-urban area. Ten hydrogeological formations have been identified, four of which (weathered Paleozoic basement, Pleistocene littoral facies, Holocene colluvial deposits, and anthropogenic filling) in the steep northern urban sector (SUNE) contribute groundwater to the flat southern urban sector (SUSL), which belongs to the “Adra River Delta” Groundwater Body (MASDRA). Groundwater recharge and discharge from the SUNE are around $0.30 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$ and $0.28 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$, respectively, while the net groundwater storage is around 0.47 Mm^3 . The high renewability of the groundwater would allow for the sustainable exploitation of this resource for auxiliary urban uses, thus alleviating pressure on the MASDRA.

Keywords: urban hydrogeology; hydrogeological map; geophysics; aquifer geometry; groundwater resource evaluation; Adra town; Spain

I. Introducción

La ocupación humana de la localidad de Adra en la región costera semiárida del sur de España no se entiende sin la posibilidad de acceder al recurso hídrico subterráneo. Desde la antigüedad, los pequeños nacientes (manantiales) suministraron el agua potable que requerían los pobladores para uso de boca y otros. Las civilizaciones se han ido sucediendo y los diferentes pobladores se han ido adaptando a unos recursos limitados, inicialmente manantiales y después pozos excavados a mano o con medios rudimentarios. Los habitantes más longevos conocen la existencia de estos manantiales y de pozos en determinados barrios de Adra. La existencia de agua subterránea es, por tanto, conocida, pero no su origen, o al menos, no en detalle. Esta forma de abastecimiento ancestral se ha ido perdiendo en favor de la distribución moderna de agua desde la Fuente de Marbella y los pozos profundos que explotan la Masa de Agua Subterránea “Delta del río Adra” (MASDRA). Sin embargo, en un mundo actual marcado por el impacto del Cambio Global, la sociedad pone sus ojos en este recurso olvidado para aliviar la escasez de agua y la degradación de los grandes acuíferos regionales y los ecosistemas dependientes del agua subterránea (EDASs).

Naciones Unidas considera el aprovechamiento del agua urbana (superficial y subterránea) para usos auxiliares una medida adaptativa al Cambio Global en regiones con estrés hídrico. El impacto del Cambio Global sobre los recursos hídricos constituye un área crítica de investigación científica, poniendo especial interés sobre como las transformaciones ambientales a gran escala impulsadas por actividades antrópicas que contribuyen al Cambio Climático exigen adaptación social y medidas de protección ecológica. Este doble desafío requiere no solo una evaluación rigurosa del impacto del Cambio Climático, sino también una evaluación integral de las consecuencias ambientales y socioeconómicas asociadas a las respuestas adaptativas humanas, en particular la gestión del recurso hídrico subterráneo y los EDASs (Alcalá et al., 2015; Pulido-Velazquez et al., 2023).

La escasez de agua en las zonas áridas costeras con recursos hídricos superficiales limitados

ha propiciado altas tasas de extracción de agua subterránea para satisfacer la creciente demanda urbana, turística, industrial y agrícola (Sabater y Barceló, 2010). Este es el caso de Adra y de otras zonas costeras de España, donde los acuíferos desempeñan un papel fundamental para sostener la economía y el medio ambiente (Custodio, 2010; Dalin et al., 2017). La combinación de las fuerzas climáticas globales subyacentes a las presiones humanas amenaza el frágil equilibrio necesario para un suministro de agua sostenible y el buen funcionamiento de los EDASs (Alcalá et al., 2015; 2018). En muchas zonas áridas densamente pobladas con regadío, se fomenta la transferencia externa de agua desde otras cuencas (Morote et al., 2019) y la producción interna de recursos no convencionales, como la reutilización del agua residual urbana y la desalinización de agua de mar y agua subterránea salobre, para hacer frente a la escasez de agua (Allam et al., 2002; Licciardello et al., 2018; Alcalá, 2019).

Cuando el agua se utiliza en zonas urbanas para uso doméstico y en zonas periurbanas para el riego agrícola, se generan flujos subterráneos de agua desde estas zonas hacia los acuíferos regionales. La infraestructura subterránea de saneamiento urbano puede no ser totalmente impermeable debido a su deterioro, permitiendo que una fracción del agua residual pueda percolar y alcanzar el acuífero antes de llegar a la planta de tratamiento. El riego de cultivos también implica una pérdida inevitable de agua que puede alcanzar el acuífero. En condiciones topográficas e hidrogeológicas favorables, por ejemplo, cuando existe una topografía escarpada y un basamento rocoso de baja permeabilidad, el retorno urbano y de riego pueden identificarse a través de cambios en la cantidad y la calidad del agua de los manantiales locales. Aunque estos mecanismos son bien conocidos, el recurso hídrico subterráneo en la mayoría de las áreas urbanas y periurbanas de tamaño mediano es desconocido porque generalmente se carece de puntos de observación y medida. Por lo tanto, la conceptualización del funcionamiento hidrogeológico de estas áreas es crucial para comprender y evaluar cómo se pueden utilizar estos flujos de agua subterránea para aliviar la presión sobre las masas de agua subterránea (MASs) sometidas a estrés hídrico.

Sin embargo, la usual baja exposición geológica en las áreas urbanas impide definir la geometría de los acuíferos, especialmente en áreas llanas donde la exploración geológica y el monitoreo del agua subterránea se limitan, como máximo, a algunos sondeos geotécnicos y pozos de bombeo. Lo contrario sucede en localidades con topografía escarpada, donde las formaciones geológicas y la dinámica del agua subterránea suelen ser parcialmente visibles y se pueden realizar evaluaciones.

Adra se ubica en una ladera escarpada con suficiente exposición hidrogeológica sobre pequeños acuíferos que contribuyen a la MASDRA, que a su vez sustenta el EDAS “Albuferas de Adra”, e incluye una zona periurbana al norte dedicada a la agricultura de regadío en invernaderos (Alcalá et al., 2008; Rodríguez-Rodríguez et al., 2011). Durante los últimos veinticinco años se han realizado investigaciones científicas multidisciplinarias para evaluar el recurso hídrico subterráneo en la zona urbana y periurbana. Una sucesión de investigaciones científicas ha permitido considerar a Adra una de las localidades con mejor definición hidrogeológica de España, destacando (1) estudios geológicos e hidrogeológicos con inventarios de datos, ensayos para la definición hidráulica de los acuíferos y cartografías de ultra detalle a escala 1:5.000; (2) ensayos geofísicos diversos para definir la geometría de acuíferos y ciertas características transitorias del agua subterránea; y (3) análisis de numerosos parámetros fisicoquímicos, diferentes isótopos estables y radioisótopos, y algunos trazadores químicos para identificar tipos de aguas subterráneas, su origen, edad, dinámica y fuentes de contaminación.

Todos los hallazgos se han integrado siguiendo tres etapas generales que determinan una evaluación precisa del recurso hídrico subterráneo (Højberg y Refsgaard, 2005; Beven, 2007): (1) definición de la geometría e hidráulica de los acuíferos; (2) conceptualización del funcionamiento hidrogeológico; y (3) evaluación de los componentes del balance hídrico. Este artículo presenta un resumen de las dos primeras etapas mencionadas, mientras que la tercera se centra en evaluar el aporte de agua subterránea desde el sector urbano norte escarpado (SUNE) al sector urbano sur llano (SUSL), perte-

Tabla 1. Descripción de los acrónimos usados.

Acrónimo	Descripción
ANAS	Almacenamiento neto de agua subterránea
APAS	Almacenamiento potencial de agua subterránea
BPM	Basamento Paleozoico meteorizado
CRA	Cuenca del río Adra
DRA	Delta del río Adra
EDAS	Ecosistemas dependientes del agua subterránea
g1	Coluvial 1 del Pleistoceno
g2	Coluvial 2 del Pleistoceno
g3	Coluvial 3 del Pleistoceno
GPR	Radar de Penetración Terrestre
MAS	Masa de Agua Subterránea
MASDRA	Masa de Agua Subterránea “Delta del río Adra”
MASW	Análisis Multicanal de Ondas Superficiales
SUNE	Sector urbano norte escarpado
SUSL	Sector urbano sur llano
t1	Facies de litoral 1 del Pleistoceno
t2	Facies de litoral 2 del Pleistoceno
VE	Velocidad de las ondas electromagnéticas
VS	Velocidad de ondas sísmicas secundarias o de cizalla

Tabla 1. Descripción de los acrónimos usados.

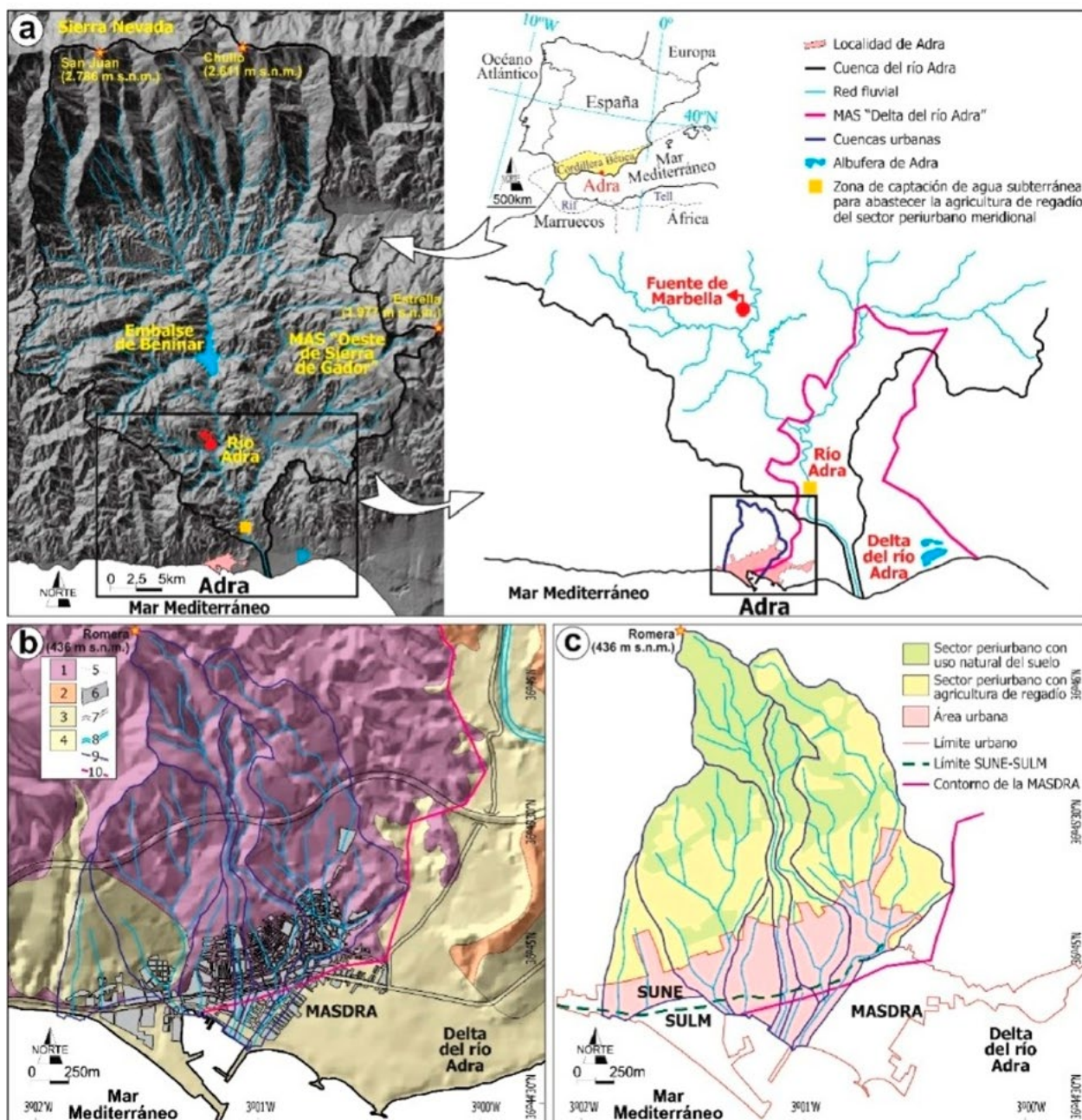
neciente a la MASDRA. Se han utilizado acrónimos para aquellos términos más repetidos a lo largo del texto. La Tabla 1 incluye la descripción de los acrónimos utilizados.

II. Área de Estudio

1. Localización y clima

La localidad de Adra ($36^{\circ}44'30''$ – $36^{\circ}45'30''$ N, $3^{\circ}00'$ – $3^{\circ}02'$ W) se ubica en la margen izquierda de la desembocadura natural de la cuenca del río Adra (CRA) en la provincia de Almería en el sur de España (Figura 1a). Su superficie urbana de $1,82 \text{ km}^2$ está atravesada por pequeñas ramblas de régimen temporal que desembocan en el Mar Mediterráneo (Figura 1b). Desde un punto de vista geomorfológico, estas cuencas urbanas delimitan un área periurbana ($2,64 \text{ km}^2$ en el rango de elevación de 50 – 436 m s.n.m.) que influye en la hidrología de una parte del área urbana ($0,97 \text{ km}^2$ en el rango de elevación de 0 – 50 m s.n.m.) aguas abajo (Alcalá et al., 2008). El área periurbana se divide en un sector sur ($1,41 \text{ km}^2$ entre 50 y 150 m s.n.m.) dedicado a agricultura de regadío en invernaderos y un sector norte ($1,23 \text{ km}^2$ entre 150 y 436 m s.n.m.) dedicado a monte bajo y matorral con escasa influencia humana (Figura 1c).

Figura 1. (a) Localización del área de estudio en el sur de España, mostrando los lugares geográficos citados en el texto. (b) Mapa geológico simplificado a escala 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1983) del área urbana y periurbana, con leyenda como sigue: (1) formaciones metamórficas del Paleozoico, (2) formaciones del Pliocenas, (3) formaciones del Pleistoceno, (4) formaciones del Holoceno, (5) contacto geológico indiferenciado, (6) área urbana, (7) carreteras, (8) río Adra, (9) cuencas urbanas y (10) límite de la Masa de Agua Subterránea "Delta del río Adra" (MASDRA). (c) Mapa de usos del suelo simplificado a escala 1:25.000 de la Red Andaluza de Información Ambiental (REDIAM, 2025) de las cuencas hidrológicas urbanas.



El clima es de tipo mediterráneo con verano cálido según la clasificación de Köppen (Chen y Chen, 2013), lo que significa un régimen semiárido con veranos calurosos y secos e inviernos templados y lluviosos (Rodríguez-Rodríguez et al., 2011). La insolación es alta, de unas 2.900 h al año en las zonas bajas.

La condición meteorológica se ha deducido de las series diarias de precipitación y temperatura

(máxima y mínima) con una resolución nodal de 0,01° (aproximadamente 1 km) de la cuadrícula Iberia01 durante el periodo 1971-2015 (Herrera et al., 2019). La precipitación (P) se produce en tres fases distintas, cada una de aproximadamente cuatro meses de duración: (1) una fase predominantemente lluviosa de octubre a enero que representa alrededor del 50% de la P anual; (2) una fase moderadamente lluviosa de febrero a mayo que representa alrededor

del 40% de la P anual; y (3) una fase seca de junio a septiembre que registra alrededor del 10% de la P anual. Se han documentado eventos extremos de lluvia de más de 80 mm en 24 h. La temperatura (T) muestra una distribución bimodal con dos periodos distintivos de unos seis meses cada uno: (1) un período cálido de mayo a octubre con una T mensual promedio mínima y máxima de 15 °C en octubre y 31 °C en julio, respectivamente; y (2) un período templado de septiembre a abril con una T mensual promedio mínima y máxima de 9 °C en enero y 20 °C en abril, respectivamente.

2. Contexto geológico e hidrogeológico

El área de estudio (Figura 1b) se encuadra dentro del Complejo Alpujárride del Dominio Interno de la Cordillera Bética (IGME, 1983; Sanz de Galdeano, 1997). La zona registra actividad tectónica como consecuencia de la convergencia entre las placas africana y euroasiática, que culminó con la colisión de los dominios Béticos Interno y Externo durante el Mioceno temprano (Alcalá et al., 2013). La combinación de actividad tectónica y variaciones del nivel del mar controla el espacio de acomodación para la sedimentación desde el Mioceno superior hasta la actualidad (Goy y Zazo, 1986).

Alcalá et al. (2002) clasificaron el registro geológico de la localidad de Adra en doce formaciones geológicas según su edad, origen y geometría. Las dos formaciones pre pre-orogénicas incluyeron esquisto micáceo y esquisto cuarzoso de grado bajo y medio del Paleozoico (basamento). Las diez formaciones post-orogénicas incluyeron formaciones sedimentarias del Plioceno al Cuaternario depositadas en discordancia sobre el basamento (Figura 1b) como: (1) una formación deltaica del Plioceno; (2) cinco formaciones del Pleistoceno, incluyendo dos generaciones de facies de litoral (t1 y t2), dos formaciones de coluviales detríticos (g1 y g2) y una formación coluvial cementada (g3); y (3) cuatro formaciones del Holoceno, incluyendo coluviales de las ramblas urbanas, aluvial del Delta del río Adra (DRA), facies de litoral actual y relleno antrópico.

Desde un punto de vista hidrogeológico regional, los sectores este y sur de la localidad de Adra se ubican en la MASDRA, justo en la desembocadura de la CRA (Figura 1a). La MASDRA tiene una superficie de 49,2 km² y un espesor saturado medio de 100 m. La recarga y descarga promedio anual de agua subterránea de la MASDRA se cifra en torno a 25 Mm³ (Pulido-Bosch et al., 1988; IGME, 1998; Rodríguez-Rodríguez et al., 2011).

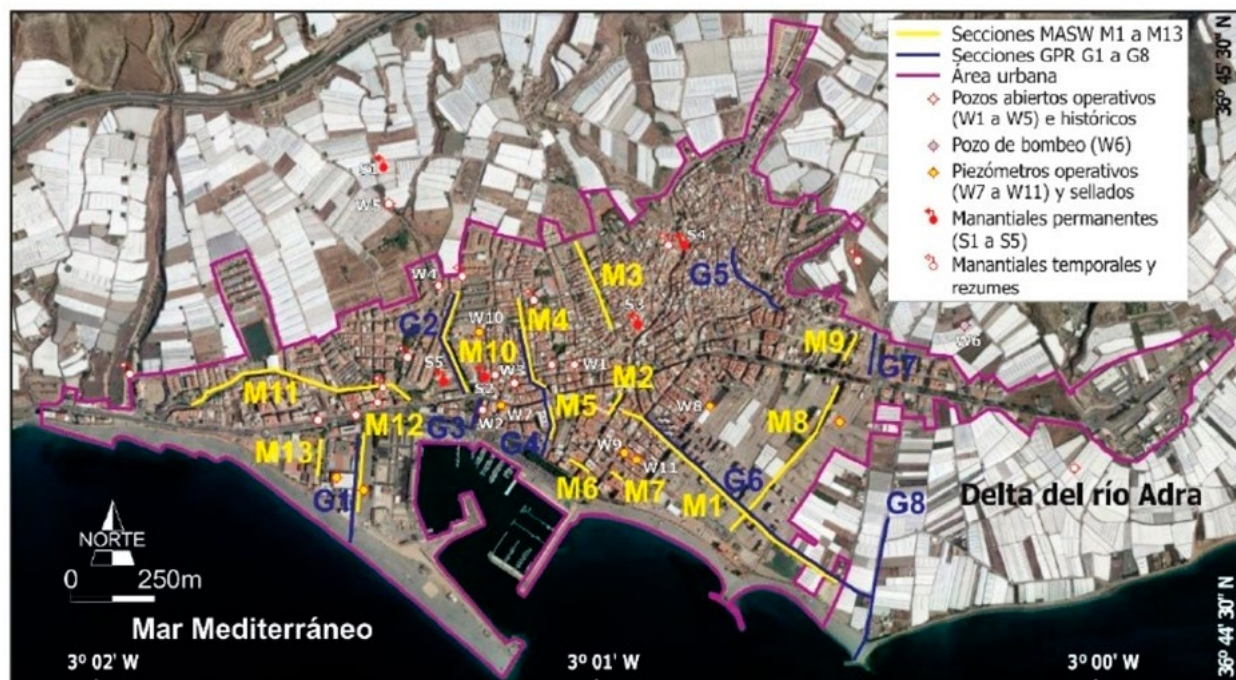
A escala de hidrogeología urbana, el SUNE incluye un acuífero marginal no catalogado oficialmente como MAS, a pesar de su relevancia histórica en el suministro de agua a hogares y pequeñas huertas (Alcalá et al., 2008). Este acuífero lo forman cuatro formaciones geológicas conectadas hidráulicamente: basamento Paleozoico meteorizado (BPM), formaciones t1 y t2 del Pleistoceno y coluviales del Holoceno.

3. Uso del suelo y dotación de agua

El área que ocupan las cuencas hidrológicas urbanas (Figura 1c) se puede dividir en tres sectores: (1) el sector periurbano norte está ocupado por monte bajo y matorral con escasa influencia humana; (2) el sector periurbano sur está dedicado a agricultura de regadío en invernaderos; y (3) el área urbana (Figura 1c). La agricultura de regadío en invernaderos es el principal motor económico (Downward y Taylor, 2007) y ha atraído nueva población en las últimas décadas. Como consecuencia, nuevas urbanizaciones han ido ocupando la fértil llanura del DRA en los sectores este y sur de la localidad (Figura 2). El censo de marzo de 2026 del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA, 2026) cifra en torno a 20.000 los habitantes del área urbana principal.

El uso del agua se destina principalmente al abastecimiento urbano y agrícola de regadío. La dotación anual de agua para abastecimiento urbano está en torno a 1,24 Mm³, de los que 0,97 Mm³ se destinan al suministro de agua a hogares, 0,16 Mm³ a la industria y servicios auxiliares, y 0,11 Mm³ al riego de jardines públicos y limpieza de viales. Para 20.000 habitantes, la dotación media de agua urbana es de 170 L por habitante y día

Figura 2. Imagen satelital mostrando los usos del suelo en la localidad de Adra, la ubicación de las secciones MASW y GPR, y los puntos de observación del agua subterránea seleccionados.



(JUNTA, 2015). El retorno urbano por fugas en la red de saneamiento se cifra en torno al 20% de la dotación urbana, según comunicación personal de la empresa gestora del abastecimiento urbano. La dotación urbana combina agua procedente de la MASDRA y la Fuente de Marbella, situada en la MAS “Oeste de Sierra de Gádor” en el tramo medio de la CRA (Figura 1a) (Alcalá et al., 2021). En el área periurbana, la dotación media anual de agua para la agricultura de regadío se cifra en torno a 7.850 m³ por hectárea, de los cuales 1.800 m³ se destinan a la desinfección del suelo cuando se rotan los cultivos intensivos. El riego por goteo reduce las pérdidas por evaporación e infiltración. La eficiencia media del riego es del 85%, por lo que el retorno del riego se estima en el 15% de la dotación aplicada (CENTER, 2007). El agua de riego es subterránea y proviene del bombeo realizado en el acuífero aluvial del río Adra, que pertenece a la MASDRA, desde el Paraje de Las Checas hasta el Paraje de Cairos (Figura 1a). La demanda urbana y agrícola no usa el agua subterránea de los acuíferos locales del SUNE, aunque algunos pozos abiertos abandonados evidencian su uso en el pasado (Alcalá et al., 2008).

III. Métodos

1. Definición geométrica e hidráulica de los acuíferos

Se ha definido la geometría y el comportamiento hidrogeológico de las formaciones geológicas existentes en la localidad de Adra combinando: (1) los resultados de las investigaciones de exploración geológica (Alcalá et al., 2002), hidrológica superficial (Alcalá et al., 2001) e hidrológica subterránea (Alcalá et al., 2008; 2021); y (2) el tipo de permeabilidad y capacidad de almacenamiento asignado a esas formaciones geológicas en diversos informes y obras oficiales (IGME, 1983; 1998; JUNTA, 2015), informes científico-técnicos (ARWUA, 2007; CENTER, 2007; CSIC, 2010) y la literatura científica (Pulido-Bosch et al., 1988; Rodríguez-Rodríguez et al., 2011; Andreu et al., 2011). Cabe destacar la importante y diversa investigación geofísica realizada en la localidad de Adra para definir la geometría de acuíferos y algunas características transitorias del agua subterránea, incluyendo diez secciones de Tomografía de Resistividad Eléctrica (Paz, 2017), trece secciones de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) (Martínez-Pagán

Figura 3. (a) Medida piezométrica en un sondeo en el Pago del Lugar durante la campaña hidrogeológica de junio de 2015. (b) Ensayo de infiltración mediante la técnica de doble anillo realizado en la calle Cerca durante la campaña hidrogeológica de marzo de 2010. (c) Ensayo de bombeo en un pozo en el Pago del Lugar durante la campaña hidrogeológica de septiembre de 2014. (d) Vista general del manantial “Mina de Carreño” en la calle Portón durante la campaña hidrogeológica de marzo de 2010. (e) Implementación del ensayo MASW M4 en la calle La Unión durante la campaña geofísica de febrero de 2014. (f) Implementación del ensayo GPR G4 en la calle La Unión durante la campaña geofísica de junio de 2015.



et al., 2018), ocho secciones de Radar de Penetración Terrestre (GPR) (Paz, 2017; Paz et al., 2017), cuatro ensayos de Autocorrelación Espacial (SPAC) (Martínez-Pagán et al., 2018), y decenas de ensayos de Relación Espectral Horizontal-Vertical (HVSr) (Navarro et al., 2007).

El conocimiento alcanzado permite considerar a Adra un laboratorio de experimentación científica donde chequear nuevas técnicas geofísicas bajo condiciones de baja incertidumbre interpretativa. De entre estas técnicas geofísicas, se describen dos de ellas por su relevancia en otras disciplinas científicas y técnicas, como la técnica sísmica MASW (Figura 2), que es de máxima utilidad en ingeniería sísmica para la zonación de riesgo sísmico urbano, y la técnica electromagnética GPR (conocida socialmente como Georradar) (Figura 2), que se suele utilizar en estudios arqueológicos, auscultación de infraestructura urbana subterránea, cimentaciones, etc.

La técnica MASW se basa en la extracción e inversión de la curva de dispersión del modo fundamental de la onda Rayleigh y los modos superiores (si están presentes) para generar un modelo unidimensional (1D) de velocidad de ondas sísmicas secundarias o de cizalla (VS) del terreno [$L T^{-1}$] (Xia et al., 1999; Park et al., 1999). La integración

de modelos 1D permite generar mapas bidimensionales (2D) de VS (Martínez-Pagán et al., 2018). La técnica GPR utiliza antenas transmisoras y receptoras para registrar el tiempo de propagación de una señal electromagnética en el subsuelo (Paz et al., 2017). Esta técnica proporciona radargramas, que son un conjunto de trazas de radar, cada una de las cuales representa la señal reflejada por el terreno (Beres y Haeni, 1991).

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (VE) [$L T^{-1}$] y sus amplitudes a través del subsuelo depende de las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales geológicos y la frecuencia de la antena utilizada (Beres y Haeni, 1991; Neal, 2004). La profundidad de penetración de la señal electromagnética disminuye a medida que aumenta el contenido de arcilla y la salinidad del medio, así como la frecuencia central de la antena (Van Dam y Schlager, 2000; Neal, 2004; Paz et al., 2017). Se remite al lector a las referencias bibliográficas indicadas para ahondar en los aspectos metodológicos de estas dos técnicas geofísicas.

Esta notable experimentación geológica y geofísica para refinar la geometría de acuíferos se ha solapado con numerosos ensayos hidráulicos para definir su funcionamiento hidrogeológico. Se destacan por su envergadura las campañas

hidrogeológicas de marzo de 2010, septiembre de 2014 y junio de 2015, dirigidas a realizar medidas de piezometría (Figura 3a), ensayos de infiltración (Figura 3b), ensayos hidráulicos en captaciones (Figura 3c), y aforos de caudal en diversos pozos abiertos (W1 a W6; Figura 2) y manantiales (S1 a S5; Figura 2) seleccionados (Figura 3d).

2. Evaluación del recurso hídrico subterráneo

La explotación de agua subterránea en los acuíferos existentes en el SUNE es prácticamente nula. Esta condición permite asumir que la descarga de agua subterránea medida en manantiales y pozos es igual a la recarga que reciben esos acuíferos. Dicha descarga constituye el aporte de recursos hídricos subterráneos que reciben las formaciones geológicas aguas abajo. Alcalá et al. (2008) sintetizan la estrategia de evaluación del recurso hídrico subterráneo implementada en la localidad de Adra. Una vez definido el contorno geológico donde establecer el balance hídrico, se implementaron dos escenarios (o regímenes) de evaluación. El primer escenario consideró un régimen natural donde la recarga de los acuíferos es función exclusiva de la precipitación, aplicando diversas técnicas, entre las que destacan balance hídrico en el suelo (Lerner, 2002; Andreu et al., 2011), balance de masa de ion cloruro atmosférico (Alcalá et al., 2011; 2015), y modelos de simulación lluvia-escorrentía diseñados para áreas no monitorizadas sin posibilidad de calibración-validación externa, como el modelo Easy Runoff (Alcalá, 2010).

El segundo escenario consideró un régimen modificado donde la recarga de los acuíferos es función de la precipitación, el retorno urbano y el retorno de riego, aplicando diversas técnicas, entre las que destacan el modelo de simulación lluvia-escorrentía Easy Runoff (Alcalá, 2010), técnicas de fluctuación del nivel piezométrico (Lerner, 2002; Andreu et al., 2011), y medidas directas de infiltración, aforo, etc. Este segundo escenario representa una evaluación del recurso hídrico subterráneo renovable forzado, al estar determinado por flujos de agua inducidos por acciones e infraestructuras creadas por el hombre, como pozos de bombeo, alcantarillados, retornos, etc.

Finalmente, se utilizó una formulación basada en la Ley de Darcy (Brown, 2002) para evaluar la descarga neta de agua subterránea, como método de validación externa del flujo total de agua subterránea asociado al régimen hídrico modificado. Este artículo omite la descripción de este complejo diseño de escenarios de evaluación. Se remite al lector a la bibliografía indicada para ahondar en los aspectos metodológicos de las técnicas de evaluación del recurso hídrico subterráneo.

IV. Resultados e Interpretación

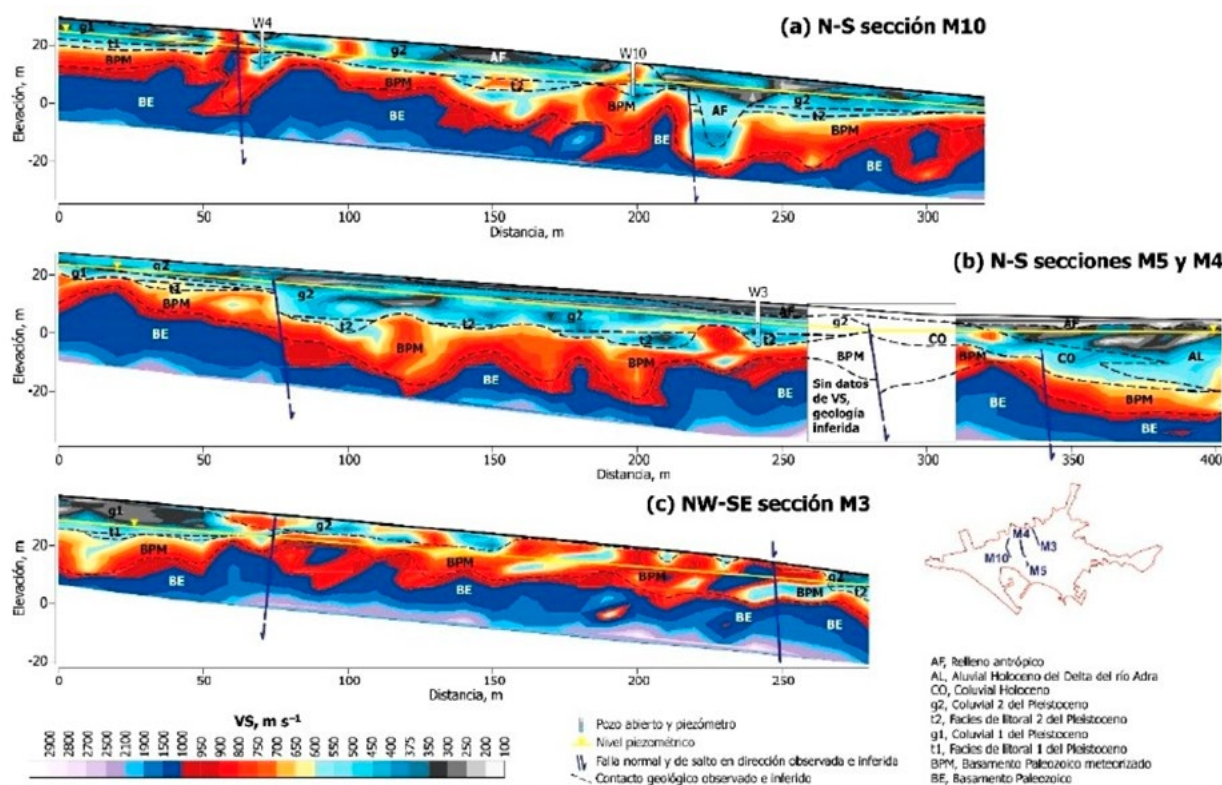
1. Caracterización geofísica

a) Ensayos MASW

La campaña geofísica de febrero de 2014 incluyó trece secciones MASW (etiquetadas de M1 a M13; Figura 2). Los ensayos MASW abarcaron todas las formaciones geológicas definidas en la localidad de Adra. La Figura 3e muestra la disposición del ensayo MASW M4. Martínez-Pagán et al. (2018) describen los detalles de la implementación de los modelos 1D de VS producidos y las secciones 2D de VS (denominadas secciones MASW) generadas (Figura 4). Los valores de VS equidistantes en la vertical de todas las secciones MASW se georreferenciaron e interpolaron para crear modelos horizontales 2D de VS a diferentes elevaciones (denominados mapas MASW) (Figura 5).

La creación de las secciones y los mapas MASW siguió la base interpretativa de Paz et al. (2020). Estos autores indican que la propagación de VS en los sedimentos es una propiedad constante específica del sitio que depende de la compactación, la cual depende de la edad y profundidad de cada material geológico apilado en la vertical (García-Jerez et al., 2007; Zimmer et al., 2007). En Adra, los valores de VS obtenidos en estudios previos (Alcalá et al., 2002; Navarro et al., 2007; Martínez-Pagán et al., 2018) fueron $<350 \text{ m s}^{-1}$ para sedimentos del Holoceno, $350\text{--}600 \text{ m s}^{-1}$ para sedimentos del Pleistoceno, $600\text{--}900 \text{ m s}^{-1}$ para sedimentos del Plioceno, $900\text{--}1200 \text{ m s}^{-1}$ para el BPM, y $>1.200 \text{ m s}^{-1}$ para el basamento Paleozoico. Algunos procesos sedimen-

Figura 4. Secciones MASW M10, M4, M5 y M3, cuya ubicación aparece en la **Figura 2**. La interpretación hidrogeológica de los valores VS incluyó el nivel piezométrico proyectado tras la campaña hidrogeológica de septiembre de 2014 y la ubicación de pozos abiertos y piezómetros W3, W4 y W10 (ver **Figura 2**). Las secciones están corregidas topográficamente y su relación de escala vertical a horizontal es 1:1.



tarios y tectónicos modifican estos rangos, como la cementación de sedimentos detríticos que aumenta VS hasta 800 m s⁻¹ o la meteorización del basamento que disminuye VS hasta 700 m s⁻¹.

Para la interpretación hidrogeológica de las secciones M1 a M13 se superpuso la información hidrogeológica disponible. La **Figura 4** muestra cuatro secciones (M10, M4, M5 y M3) de especial interés para deducir el funcionamiento hidrogeológico del SUNE. Las secciones M10 (**Figura 4a**), M4 (**Figura 4b**) y M3 (**Figura 4c**) muestran el SUNE, mientras que la sección M5 (**Figura 4b**) muestra el SUSL. Por su continuidad, las secciones M4 y M5 se interpretaron como una sola sección. A continuación, se presenta una descripción concisa de estas secciones MASW.

La capa superior de 1–8 m de espesor con VS <300 m s⁻¹ se atribuye al relleno antrópico (secciones M10, M4, M5 y M3), la capa subyacente de 2–10 m de espesor con VS >350 m s⁻¹ a coluviales y facies de litoral actual del Holoceno (sección M5), la capa subyacente de 10–15 m de espesor con 300 <

VS <600 m s⁻¹ a g1 y g2 ricos en arcilla y t1 y t2 de grano grueso (t1 no se identifica en la sección M3), la capa subyacente de 5–10 m de espesor con 600 < VS <900 m s⁻¹ a niveles cementados en la parte inferior de t1 y t2, la capa subyacente de 15–20 m de espesor con 900 < VS <1200 m s⁻¹ a BPM, y la capa más profunda con VS >1.200 m s⁻¹ al basamento Paleozoico. Esta distribución vertical de VS encaja bien con la información geológica, pero se observan algunas discrepancias. En M10, el valor puntual de VS <300 m s⁻¹ subyacente a t2 se debe a una galería excavada en el siglo XIX en la Fundición de Santo Tomás (Fundición de Heredia) para drenar agua subterránea. En M10, M4 y M3, algunos parches incrustados en g1 y g2 con VS >1.000 m s⁻¹ se atribuyen a bloques aislados de basamento. Los pares g1–t1 y g2–t2 muestran similar 300 < VS <600 m s⁻¹, lo que limita poder identificar el límite superior del acuífero que forma t1 y t2 respecto del límite inferior del acuitardo (formación de permeabilidad baja que suele confinar una formación de alta permeabilidad catalogada como acuífero) que forman g1 y g2. La parte más baja de

Figura 5. Mapas MASW generados a diferentes elevaciones respecto del nivel del mar, mostrando la ubicación de las secciones MASW M1 a M13 y los sistemas de fallas normales y de salto en dirección observadas e inferidas.

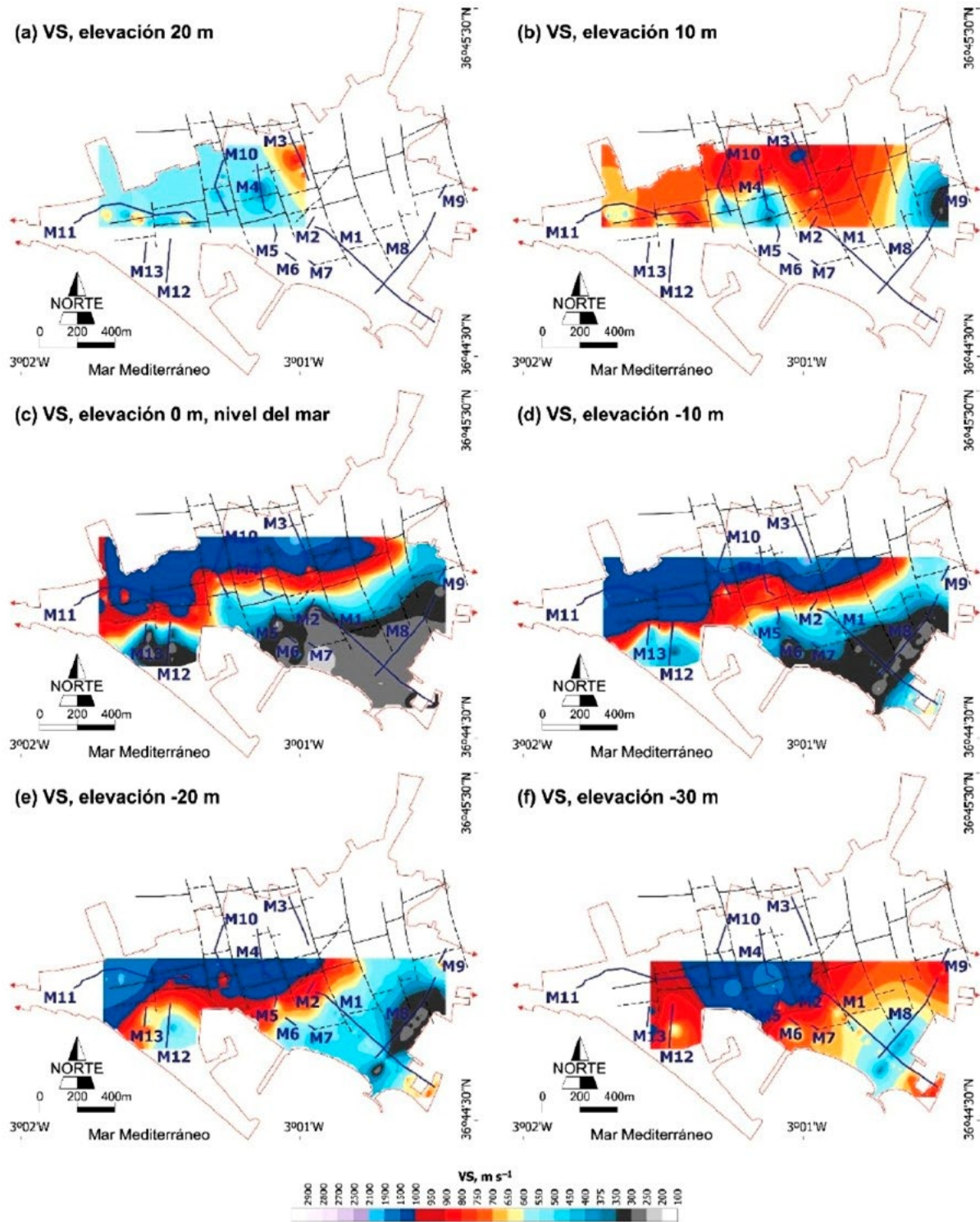
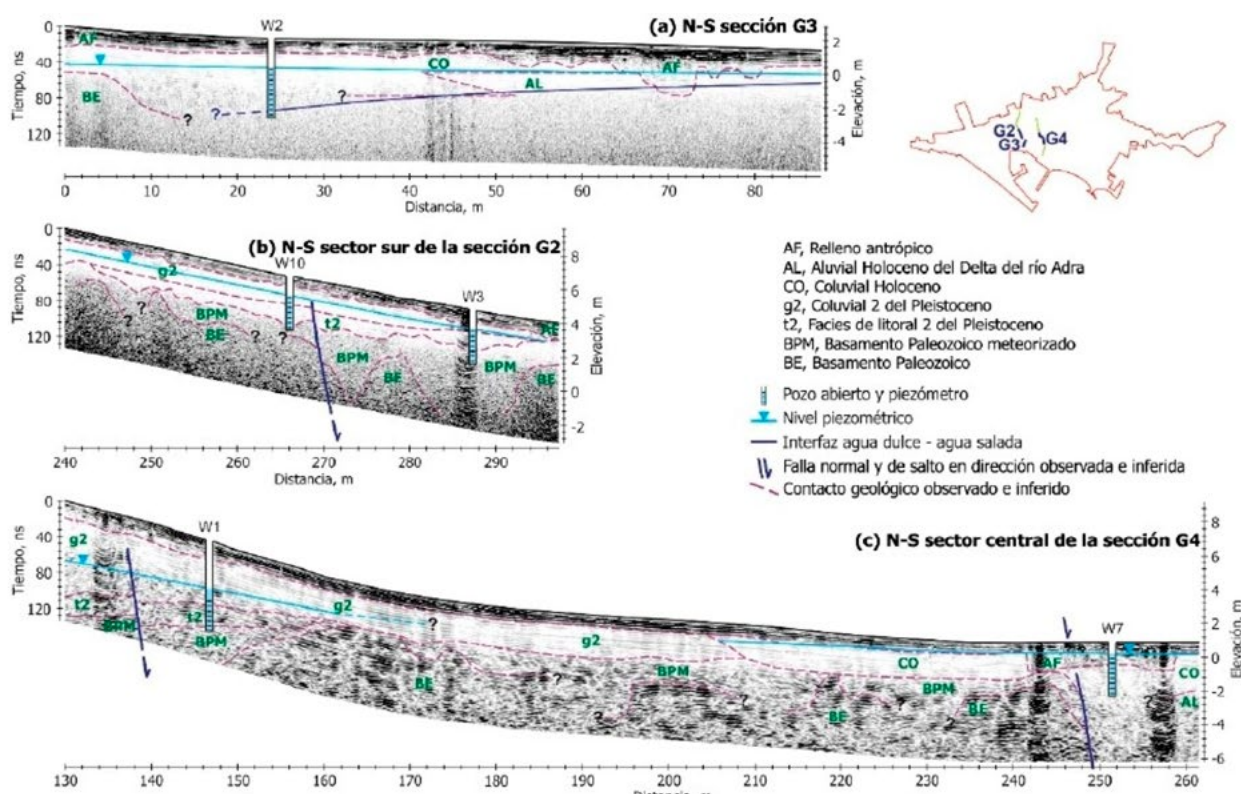


Figura 6. Sectores de las secciones GPR G2, G3 y G4 de interés hidrogeológico, cuya ubicación aparece en la **Figura 2**. La interpretación hidrogeológica de los radargramas se basó en datos hidrogeológicos y las secciones MASW (**Figura 4**). Se incluye el nivel piezométrico proyectado tras la campaña hidrogeológica de junio de 2015 y la ubicación de pozos abiertos y piezómetros W1, W2, W3, W7 y W10 (ver **Figura 2**). Las secciones están corregidas topográficamente y su relación de escala vertical a horizontal es 1:2.



t1 y t2 y la parte más alta de BPM están cementadas y muestran similar VS $< 900 \text{ m s}^{-1}$, lo que impide definir su límite. Como se describirá en la sección 4.1.2, los radargramas han permitido desambiguar estos límites.

Los mapas MASW (**Figura 5**) muestran interrupción de la continuidad espacial de VS por la acción de fallas normales NW-SE y de salto en dirección NE-SW asociadas a la tectónica activa. El primer tipo de fallas determina el espacio de acomodación para la sedimentación cuaternaria, mientras que el segundo tipo compartimenta el basamento Paleozoico, induciendo interrupciones en algunas formaciones como t1 y t2. Los mapas MASW identifican límites geológicos de interés hidrogeológico, como (1) la profundidad del basamento (batimetría) en los mapas de elevación de 0 m (**Figura 5c**), -10 m (**Figura 5d**) y -20 m (**Figura 5e**); (2) el límite SUNE-SUSL en los mapas de elevación de 0 m (**Figura 5c**) y -10 m (**Figura 5d**); y (3) la extensión del BPM en el mapa de elevación de 10 m (**Figura 5b**).

b) Ensayos GPR

En la campaña geofísica de junio de 2015 se completaron ocho secciones GPR (etiquetadas de G1 a G8; **Figura 2**). Los ensayos GPR abarcaron todas las formaciones geológicas definidas en la localidad de Adra, y siguieron aproximadamente el trazado de las secciones MASW. La **Figura 3f** muestra la disposición del ensayo GPR G4. Paz et al. (2017) describen los detalles de la implementación de los ensayos GPR para (1) delimitar estructuras geológicas con valores similares de VS, como los pares t1-g1 y t2-g2; (2) deducir el espesor del relleno antrópico; y (3) delimitar características transitorias del agua subterránea como el nivel piezométrico, la franja de ascenso capilar del agua subterránea y la interfaz de agua dulce-agua de mar.

La **Figura 6** muestra tres secciones GPR (G2, G3 y G4) de interés para deducir el funcionamiento hidrogeológico del SUNE. En Adra, la topografía escarpada determina reflexiones subhorizontales para los sedimentos del Pleistoceno en el SUNE

y horizontales para los sedimentos del Holoceno en el SUSL. El sector sur de la sección G2 (Figura 6b) y el sector central de la sección G4 (Figura 6c) muestran cómo t2 produce reflexiones más fuertes que g2 debido a la cementación, lo que permite su identificación. Fuera de los sectores mostrados, el par t1-g1 muestra el mismo comportamiento. El basamento Paleozoico y el BPM producen reflexiones fuertes de similar magnitud, lo que impide definir sus límites en algunos casos. Un reflector fácilmente detectable dentro de las formaciones g1 y g2 ricas en arcilla en las secciones G2 (Figura 6b) y G4 (Figura 6c) es la franja de ascenso capilar del agua subterránea, que sigue de cerca la piezometría medida en los pozos W1, W3 y W10 (Figura 2). Esto significa que t1, t2 y la parte superior de BPM forman juntos un acuífero libre cuyo flujo ascendente de agua subterránea determina la posición de la franja de ascenso capilar de agua subterránea dentro de g1 y g2, que actúan como acuitardos.

En el SUSL, la sección G3 (Figura 6a) y el sector central de la sección G4 (Figura 6c) muestran cómo el aluvial Holoceno del DRA produce reflectores intensos. En estos sedimentos de grano grueso, la primera reflexión intensa se asociada a la detección

del agua subterránea. Esta reflexión es más fuerte que la observada en g1 y g2 y se encuentra mucho más cerca del nivel piezométrico, como se deduce de la piezometría medida en los pozos W2 y W7 (Figura 2), corroborando así el comportamiento no confinado de esta formación. En la sección G3 (Figura 6a), la pérdida de señal de VE por debajo del nivel del mar se atribuye a la interfaz de agua dulce – agua de mar.

2. Conceptualización hidrogeológica

Esta sección cumplimenta los dos primeros objetivos de este artículo, es decir, la definición geométrica e hidráulica de las formaciones geológicas en la totalidad del área urbana total y en el SUNE. Para la definición geométrica, la integración de los datos geológicos y los hallazgos geofísicos permitió preparar el mapa hidrogeológico a escala 1:5.000 de la localidad de Adra (Figura 7) y varias secciones hidrogeológicas.

La Figura 8 muestra tres de estas secciones. Para la definición hidráulica, se preparó una base de datos de permeabilidad y porosidad efectiva a partir de (1) datos compilados de la literatura descrita en la

Figura 7. Mapa hidrogeológico de la localidad de Adra a escala 1:5.000, mostrando los puntos de observación operativos e históricos de agua subterránea seleccionados, los sitios donde se observa la descarga de agua subterránea al mar y la localización de las secciones hidrogeológicas I-I', II-II' y III-III', las cuales se muestran en la Figura 8.

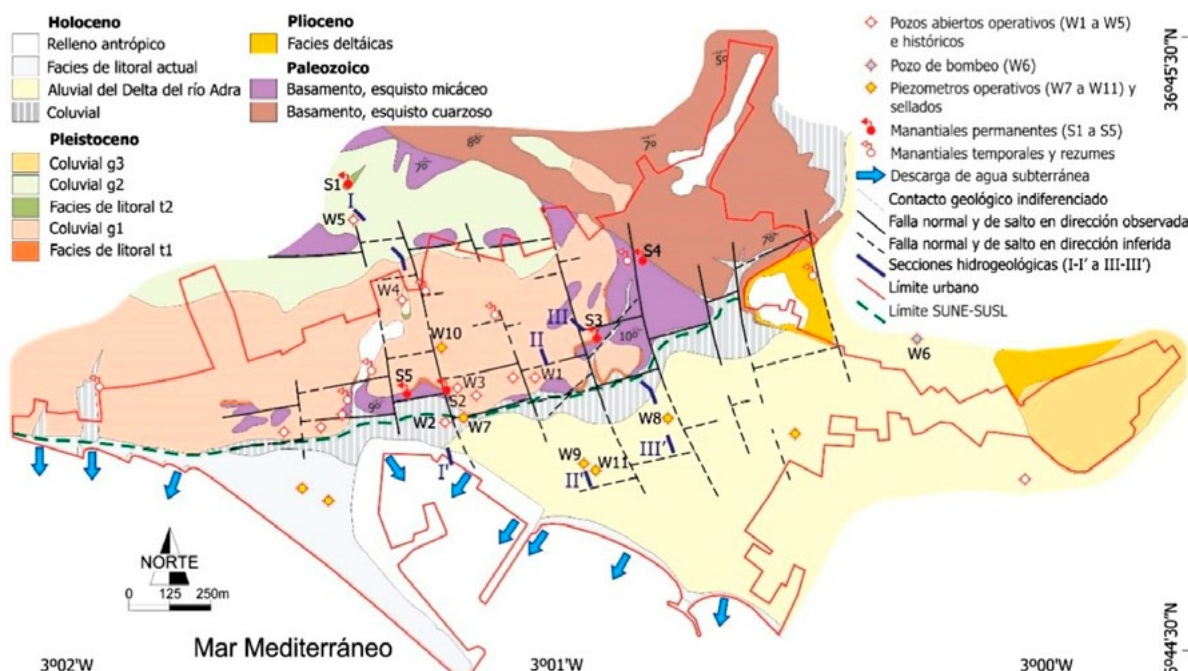
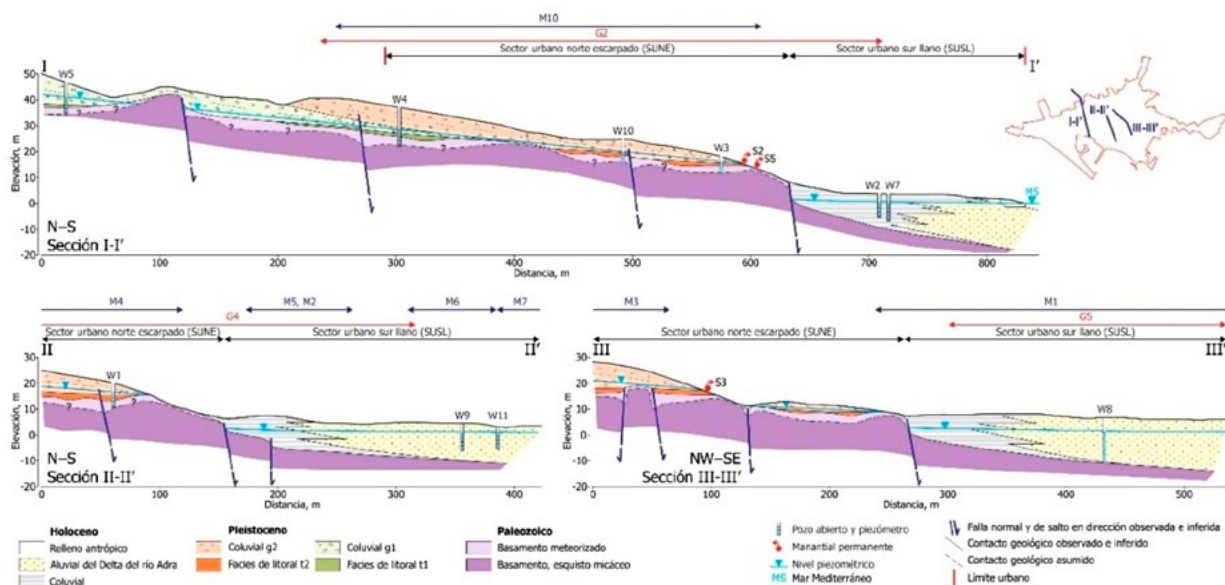


Figura 8. Secciones hidrogeológicas I-I', II-II' y III-III' (ver su localización en la **Figura 7**), mostrando las distancias cubiertas por las secciones MASW (líneas azules con flechas de doble sentido) y las secciones GPR (líneas rojas con flechas de doble sentido), los puntos de observación operativos e históricos de agua subterránea seleccionados, y el nivel piezométrico proyectado después de la campaña hidrogeológica de junio de 2015. Las secciones están corregidas topográficamente y su relación de escala vertical a horizontal es 1:2.



Sección 3.1.1, que incluyó publicaciones oficiales dedicadas a estudiar la formación aluvial del Holoceno del DRA en el SUSL, informes científico-técnicos que estudiaron el SUNE y el SUSL, y publicaciones científicas que cubrieron el SUNE y el SUSL; y (2) datos de ensayos de campo específicos del SUNE, que incluyeron cinco pruebas de infiltración en formaciones de baja permeabilidad (**Figura 3b**), tres pruebas de bombeo en pozos abiertos en formaciones de alta permeabilidad y diecinueve curvas granulométricas en diferentes formaciones.

Esta información permitió clasificar las doce formaciones geológicas en diez formaciones hidrogeológicas según su tipo de permeabilidad y capacidad de almacenamiento (**Tabla 2**). El almacenamiento potencial de agua subterránea (APAS) de cada formación hidrogeológica se define como el producto de la superficie (extensión de afloramientos directos y subyacentes), el espesor (saturado y no saturado) y la porosidad efectiva (**Tabla 2**). El APAS debe considerarse una magnitud tentativa de la capacidad máxima de almacenamiento, no de la capacidad real o neta. El APAS se calculó para todas las formaciones geológicas existentes en el área urbana.

El basamento Paleozoico (esquisto micáceo y esquisto cuarzoso) es una formación de baja permeabilidad que constituye la base de los acuíferos

en el área urbana (**Tabla 2**). En términos hidrogeológicos, este tipo de formación se denomina acuícludo. Las secciones MASW (**Figura 4**) y los mapas MASW (**Figura 5**) identifican el basamento Paleozoico con $VS > 1200 \text{ m s}^{-1}$.

La Formación BPM es un medio poroso que forma un acuífero de permeabilidad moderada. En el SUNE, su superficie es de $0,68 \text{ km}^2$, su espesor oscila entre 1 m y 18 m, y su APAS promedio está en torno a $0,27 \text{ Mm}^3$ (**Tabla 2**). La geometría de BPM se puede deducir mediante VS en el rango de $800\text{--}1200 \text{ m s}^{-1}$ en las secciones MASW (**Figura 4**) y los mapas MASW (**Figura 5**). Su recarga proviene de la infiltración directa de la precipitación y la escorrentía, así como del retorno urbano y de riego.

La formación de facies deltaicas del Plioceno se deposita en discordancia sobre el basamento Paleozoico en el SUSL. Esta formación se cataloga como un acuífero de permeabilidad moderada a alta (**Figura 7**) de $0,09 \text{ km}^2$, con un espesor de entre 4 m y 31 m y un APAS promedio en torno a $0,03 \text{ Mm}^3$ (**Tabla 2**). Su recarga proviene de la transferencia que recibe desde la formación aluvial del Holoceno del DRA.

El registro del Pleistoceno incluye dos secuencias sedimentarias litorales-continuales en el

Tabla 2. Geometría, propiedades hidráulicas y almacenamiento potencial de agua subterránea (APAS) de las formaciones hidrogeológicas en la totalidad del área urbana y en el SUNE. Las cifras indican el rango observado o calculado de cada parámetro o variable.

Edad	Formación hidrogeológica	Principal litología	Superficie en área urbana, km ²	Superficie en el SUNE, km ²	Superficie en el SUNE, Espesor, m	Permeabilidad, d ⁻¹	Porosidad efectiva, fracción adimensional	APAS en el área urbana, Mm ³	APAS en el SUNE, Mm ³	Comportamiento hidráulico
Paleozoico	Basamento	Esquisto micáceo y cuarzo	1,82	0,77	—	—	—	—	—	Acuíclido
	Basamento meteorizado	Esquisto micáceo y cuarzo	0,86	0,68	1–18 (8)	0,9–1,5 (1,1)	0,02–0,07 (0,05)	0,02–1,08 (0,34)	0,01–0,86 (0,27)	Acuífero
Plioceno	Facies deltaicas	Arenas, gravas, limos	0,09	—	4–31 (17)	1,1–5,2 (2,9)	0,01–0,05 (0,02)	<0,01–0,14 (0,03)	—	Acuífero
Pleistoceno	Facies de litoral t1 y t2	Gravas, arenas	0,41	0,41	1–8 (4)	2,3–9,3 (4,2)	0,06–0,17 (0,13)	0,03–0,56 (0,21)	0,03–0,53 (0,21)	Acuífero
	Coluvial detrítico g1 y g2	Gravas, arenas, arcillas	0,58	0,58	1–32 (9)	0,05–0,09 (0,07)	<0,01–0,01 (<0,01)	<0,01–0,20 (0,04)	<0,01–0,20 (0,04)	Acuitardo
	Coluvial cementado g3	Gravas cementadas, arenas	0,10	—	1–29 (14)	0,12–0,44 (0,28)	0,01–0,03 (0,02)	<0,01–0,09 (0,03)	—	Acuitardo
	Aluvial del Delta del río Adra	Arenas, limos	0,35	0,11	1–21 (9)	0,8–2,9 (1,4)	0,05–0,10 (0,07)	0,02–0,74 (0,22)	<0,01–0,23 (0,07)	Acuífero
Holoceno	Facies de litoral actual	Arenas	0,59	—	1–35 (19)	5,3–30,7 (13,8)	0,04–0,12 (0,07)	0,02–2,48 (0,78)	—	Acuífero
	Coluvial	Gravas, arenas, arcillas	0,17	—	1–9 (4)	5,1–30,3 (14,5)	0,08–0,17 (0,13)	0,01–0,26 (0,09)	—	Acuífero
	Relleno antrópico	Bloques, arenas, limos	0,17	0,05	1–6 (3)	5,2–8,2 (6,7)	0,14–0,23 (0,17)	0,02–0,24 (0,09)	<0,01–0,07 (0,03)	Acuífero

SUNE y una secuencia continental en el SUSL (Figura 7). A continuación, se describen brevemente ambas secuencias.

En el SUNE, las dos secuencias litorales-continuales aparecen discordantes sobre el basamento Paleozoico (Figura 8). Cada secuencia incluye facies de litoral (t1 y t2) subyacentes a coluviales arcillosos (g1 y g2) (Figuras 7 y 8). Las t1 y t2 forman un acuífero de alta permeabilidad de 0,41 km², de entre 1 m y 8 m de espesor y un APAS promedio en torno a 0,21 Mm³ (Tabla 2). Las t1 y t2 están conectadas hidráulicamente al BPM y parcialmente desconectadas entre sí, como se deduce de las secciones MASW (Figura 4) y GPR (Figura 6). Los sistemas de fallas normales y de salto en dirección compartimentan t1 y t2, pero no interrumpen la continuidad del BPM, como se deduce del mapa MASW de elevación de 10 m (Figura 5b).

Como resultado, el agua subterránea puede fluir a través de BPM, t1 y t2, formando así un único acuífero confinado en el SUNE. La geometría, la piezometría en pozos abiertos y la descarga de agua subterránea en manantiales a diferente elevación corroboran este comportamiento hidráulico confinado (Figura 8). Este acuífero está conectado hidráulicamente (y descarga) a la formación aluvial no confinada del Holoceno del DRA. Su recarga proviene de la infiltración directa de la precipitación y la escorrentía, así como del retorno urbano y de riego g1 y g2 son formaciones de permeabilidad

baja catalogadas como acuitardos que confinan t1 y t2, respectivamente (Figuras 7 y 8). Su superficie es 0,58 km², su espesor oscila entre 1 m y 32 m, y su APAS promedio está en torno a 0,04 Mm³ (Tabla 2).

En el SUSL, la tercera secuencia continental del Pleistoceno incluye una formación coluvial cementada (g3) depositada en discordancia sobre la formación de facies deltaicas del Plioceno. Esta formación de permeabilidad moderada a baja se cataloga como acuitardo (Figura 7). Su superficie es de 0,10 km², su espesor oscila entre 1 m y 29 m, y su APAS promedio está en torno a 0,03 Mm³ (Tabla 2). Su recarga proviene de la infiltración directa de la precipitación y la escorrentía, y de la transferencia que recibe desde la formación aluvial del Holoceno del DRA.

El registro sedimentario del Holoceno incluye cuatro formaciones: coluvial, aluvial del DRA, facies de litoral actual y relleno antrópico. A continuación, se presenta una breve descripción.

La formación coluvial se emplaza en el límite SUNE-SUSL en discordancia sobre el basamento Paleozoico y el par t2–g2 (Figuras 7 y 8). Se cataloga como un acuífero de permeabilidad moderada a alta. En el SUNE, su superficie es de 0,11 km², su espesor oscila entre 1 m y 21 m, y su APAS promedio está en torno a 0,07 Mm³ (Tabla 2). Su recarga proviene de la descarga de formaciones hidrogeológicas situadas aguas arriba, la infiltración directa de la precipitación y la escorrentía, y el retorno

urbano. La descarga se realiza hacia la formación aluvial del Holoceno del DRA y el mar.

La formación aluvial del DRA se localiza en el SUSL y pertenece a la MASDRA. Está catalogada como un acuífero de alta permeabilidad (Figura 7). Su superficie es de 0,59 km², su espesor oscila entre 1 m y 35 m, y su APAS promedio está en torno a 0,78 Mm³ (Tabla 2). Su recarga proviene de la infiltración que el aluvial del valle del río Adra recibe aguas arriba, así como del retorno urbano y de riego. Su descarga se produce por bombeo y por transferencia hacia otras formaciones hidrogeológicas.

La formación de facies de litoral actual se localiza en el SUSL y es resultado de los depósitos litorales acumulados tras las sucesivas obras civiles costeras realizadas en la localidad, desde la construcción del puerto de Adra hasta los recientes espigones para evitar la erosión costera (Alcalá et al., 2002). Solo las playas occidentales tienen interés hidrológico, formando un acuífero somero de alta permeabilidad de 0,17 km², espesor entre 1 m y 9 m y un APAS promedio en torno a 0,09 Mm³ (Tabla 2). Su recarga proviene de la infiltración de la precipitación y la escorrentía, y de la descarga de otras formaciones hidrogeológicas situadas aguas arriba.

La formación de relleno antrópico aparece como parches de permeabilidad alta que contribuyen a la escorrentía urbana o al almacenamiento de agua subterránea cuando se superponen a formaciones de baja o alta permeabilidad, respectivamente. Algunos afloramientos de esta formación son relativamente antiguos y datan desde la época fenicia. En el SUNE, su superficie es de 0,05 km², su espesor oscila entre 1 m y 6 m, y su APAS promedio está en torno a 0,03 Mm³ (Tabla 2). Su recarga proviene de la infiltración de la precipitación y la escorrentía, así como del retorno urbano.

3. Evaluación del recurso hídrico subterráneo

Esta sección cumplimenta el tercer objetivo de este artículo: la evaluación del recurso hídrico subterráneo en el SUNE. Excluyendo las formaciones que actúan como acuícludos (basamento Paleozoico) y acuitardos (g1, g2 y g3), el APAS promedio en la localidad de Adra está en torno a

1,77 Mm³, con un rango que puede variar entre 0,12 y 5,49 Mm³ si se utilizan los valores mínimo y máximo de espesor saturado y porosidad efectiva de la Tabla 2. En el SUNE, g1 y g2 confinan el acuífero formado por BPM, t1 y t2. Excluyendo al basamento Paleozoico, g1 y g2, el APAS promedio está en torno a 0,58 Mm³ y su rango de variación es 0,05–1,71 Mm³ (Tabla 2).

La contribución real de agua subterránea al SUSL debe ser menor que el APAS promedio, que representa el valor máximo teórico. Dado que la explotación de agua subterránea es prácticamente nula, la descarga de agua subterránea desde el SUNE puede considerarse un indicador fiable del agua subterránea que el SUNE aporta al SUSL. Para la evaluación de la descarga de agua subterránea mediante la formulación basada en la Ley de Darcy, las formaciones hidrogeológicas del SUNE se agruparon en tres acuíferos: (1) el formado por BPM, t1 y t2 (denominado como acuífero SUNE); (2) el sector norte de la formación coluvial del Holoceno; y (3) los parches de relleno antrópico. Excluyendo g1 y g2, que se comportan como acuitardos, el caudal promedio anual de agua subterránea que descarga el SUNE hacia el SUSL está en torno a 0,28 Mm³ (Tabla 3). Esta cifra variaría en el rango de 0,03–1,02 Mm³ año⁻¹ si se consideran los valores mínimos y máximos de espesor saturado y permeabilidad incluidos en la Tabla 2.

El almacenamiento neto de agua subterránea (ANAS) se expresa como el producto de los valores de superficie de afloramientos directos y subyacentes a otras formaciones más modernas, espesor saturado y la porosidad efectiva incluidos en la Tabla 2. Redondeando, el valor promedio de ANAS en el SUNE está en torno a 0,47 Mm³ (Tabla 3).

La descarga de agua subterránea desde el SUNE se comparó con la recarga de agua subterránea producida por la precipitación en el área periurbana (2,64 km²) y el SUNE (0,77 km²), el retorno de riego producido en el sector periurbano sur dedicado a la agricultura de regadío en invernaderos (1,41 km²) y el retorno urbano producido en el SUNE (Tabla 4).

La recarga por la precipitación se estimó mediante las técnicas de evaluación del recurso hídrico subterráneo que se han descrito en la Sección 3.2

Tabla 3. Descarga de agua subterránea desde el SUNE tras aplicar una formulación basada en la Ley de Darcy y almacenamiento neto de agua subterránea (ANAS) en el SUNE. Las cifras indican el rango calculado de cada variable.

Edad	Formación hidrogeológica	Descarga, Mm ³ año ⁻¹	ANAS, Mm ³
Paleozoico	Basamento meteorizado	0,02–0,55 (0,18)	0,01–0,73 (0,23)
Pleistoceno	Facies de litoral t1 y t2	0,01–0,36 (0,08)	0,02–0,47 (0,18)
Pleistoceno	Coluvial g1 y g2	<0,01–0,03 (< 0,01)	<0,01–0,10 (0,02)
Holoceno	Coluvial	<0,01–0,11 (0,02)	<0,01–0,14 (0,04)
Holoceno	Relleno antrópico	<0,01	<0,01–0,03 (0,01)

Tabla 4. Componentes de la recarga producida en o que alcanza el SUNE. Las cifras representan el valor promedio deducido de los valores incluidos en las Tablas 2 y 3.

Componente de recarga	Zona *	Área, km ²	Recarga, Mm ³ año ⁻¹
Precipitación	Área periurbana y SUNE	3,41	0,03
Retorno urbano	SUNE	0,77	0,10
Retorno de riego	Sector periurbano sur agrícola	1,41	0,17

para los escenarios (o regímenes) natural y modificado. Según Alcalá et al. (2008), la tasa promedio de recarga por la precipitación en el área urbana y periurbana está en torno a 10 mm año⁻¹. Esta magnitud es similar a la que reportan Andreu et al. (2011) en otras zonas costeras del sur de la provincia de Almería con similar litología. Esta tasa de recarga se puede expresar en términos volumétricos en torno a 0,03 Mm³ si se considera la superficie de las formaciones hidrogeológicas de permeabilidad moderada a alta susceptibles de recibir una recarga significativa (Tabla 4).

Como se describe en la Sección 2.3, la dotación media anual de agua para suministro urbano es 1,24 Mm³ (JUNTA, 2015). Tras comprobar una densidad de habitantes similar a lo largo de la zona urbana, esta cifra se aproximó a 0,52 Mm³ para los 0,77 km² del SUNE. Aplicando el coeficiente de retorno urbano promedio del 29% que comunicó la empresa gestora del abastecimiento urbano, el retorno urbano medio anual que contribuye a la recarga es del orden de 0,10 Mm³ (Tabla 4).

La dotación media de agua para la agricultura de regadío es 7.850 m³ por hectárea y año y el coeficiente de retorno de riego medio es del 15% (CENTER, 2007). El retorno de riego medio anual que contribuye a la recarga resulta en torno a 0,17 Mm³ (Tabla 4).

La recarga media anual de agua subterránea resulta en torno a 0,30 Mm³ (Tabla 4). Esta cifra es sólo 0,02 Mm³ superior a la descarga media de agua subterránea, lo que supone una diferencia relativa de solo el 6% que corrobora la calidad de la evaluación.

V. Conclusiones

El clima favorable de la región costera mediterránea ha favorecido una creciente urbanización y ocupación de las áreas periurbanas para la agricultura de regadío de alta rentabilidad económica. Los nuevos usos del suelo y la demanda creciente de agua han puesto de manifiesto la naturaleza limitada de recursos hídricos convencionales, mientras que el uso intensivo del agua genera un recurso hídrico no convencional de gestión viable que puede complementar al convencional. En un contexto de Cambio Global con demanda creciente de agua, los pequeños acuíferos marginales en áreas urbanas y periurbanas pueden complementar la dotación urbana para ciertos usos auxiliares, aliviando el estrés hídrico de las MAS y los EDASs. El planeamiento de las ciudades inteligentes del futuro cercano deberá considerar nuevos paradigmas de sostenibilidad, como el reciclaje y la reutilización del agua usada, dando un uso adicional (una segunda oportunidad) al agua subterránea de baja calidad de las zonas urbanas.

La localidad de Adra representa un ejemplo excepcional de conocimiento hidrogeológico que permite ilustrar esta problemática e introducir metodologías viables para conceptualizar el funcionamiento de los acuíferos urbanos, en este caso, el aporte de agua subterránea que se produce desde el SUNE al SUSL. Para ello, se han combinado los resultados de los sucesivos estudios geológicos, geofísicos, hidrológicos e hidrogeológicos desarrollados durante los últimos veinticinco años. El primer paso ha sido crear un mapa y secciones hidrogeológicas a escala 1:5.000. Esta escala de observación es única en España. La descarga promedio anual de agua subterránea desde el SUNE se ha estimado en torno a 0,28 Mm³. Entre otros usos, este recurso puede garantizar un suministro permanente de agua para el riego de jardines públicos y la limpieza de viales urbanos y periurbanos, que actualmente ronda los 0,11 Mm³ año⁻¹.

Este uso auxiliar del agua aumentará en el futuro conforme aumente la extensión urbana del municipio debido a creación de nuevas áreas urbanizadas y crezca la demanda social de espacios verdes. El uso de este recurso hasta ahora no evaluado podría aliviar la presión que actualmente ejerce el abastecimiento urbano de Adra sobre la MASDRA, la cual está declarada oficialmente como sobreexplotada al incumplir los niveles de cantidad y calidad de la Directiva Europea Marco del Agua (DMA, 2020).

Este artículo divulgativo, aunque con suficiente rigor científico, ilustra el desempeño de la comunidad científica para buscar rutas metodológicas viables para investigar el agua subterránea en áreas urbanas de tamaño mediano con acuíferos someros y áreas periurbanas que influyen en la hidrología urbana. La magnitud de las cifras promedio aportadas se debe considerar con cautela y siempre en relación a su elevado rango de variación por causas naturales, algo que es inherente al campo de la Hidrología.

VI. Agradecimientos

El autor agradece a la empresa gestora del abastecimiento y saneamiento urbano del municipio de Adra la información proporcionada, así como a las Comunidades de Regantes el acceso a sus captaciones y la información facilitada sobre

sistemas de riego. Este artículo se alinea con la actividad de divulgación científica de los proyectos de investigación CiROCCO (Grant nº 101086497) financiado por el EU HORIZON de la Unión Europea, y NATURAL (PID2024-158786NB-C22) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

VII. Bibliografía

- Alcalá, F.J. (2010). Easy Runoff v.1: Code for generating design hyetographs and modelling rainfall-runoff events. Patente 1097/2010. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Alcalá, F.J. (2019). Usefulness of the Cl/Br ratio to identify the effect of reverse osmosis treated waters on groundwater systems. *Desalination*, 470: 114102. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114102>
- Alcalá, F.J., Zapata, A. y Morillas-Arcos, M. (2001). Estructuras de detención/retención en la localidad de Adra (Almería). Posible alternativa al aprovechamiento de aguas pluviales. En V Simposio Sobre el Agua en Andalucía, Almería, 1: 143-154.
- Alcalá, F.J., Espinosa, J., Navarro, M. y Sánchez, F.J. (2002). Propuesta de división geológica de la localidad de Adra (provincia de Almería). Aplicación a la zonación sísmica. *Revista de la Sociedad Geológica España* 2002, 15, 55-66. [https://sge.usal.es/archivos/REV/15\(1-2\)/Art05.pdf](https://sge.usal.es/archivos/REV/15(1-2)/Art05.pdf)
- Alcalá, F.J., Solé, A., Creus, C. y Domingo, F. (2008). Aporte urbano de agua subterránea hacia masas hídricas regionales y ecosistemas dependientes. Caso de la localidad costera de Adra (SE de España). En VII Simposio del Agua en Andalucía. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Volumen 2, pp.699-708.
- Alcalá, F.J., Cantón, Y., Contreras, S., Were, A., Serrano-Ortiz, P., Puig de fábregas, J., Solé-Benet, A., Custodio, E. y Domingo, F. (2011). Diffuse and concentrated recharge evaluation using physical and tracer techniques: Results from a semiarid carbonate massif aquifer in southeast Spain. *Environmental Earth Sciences*, 62: 541-557. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0546-y>
- Alcalá, F.J., Guerrero, F., Martín-Martín, M., Raffae-lli, G. y Serrano, F. (2013). Geodynamic implications derived from Numidian-like distal turbidites deposited along the Internal-External Domain Boundary of the Betic Cordillera (S, Spain). *Terra Nova*, 25: 119-129. <https://doi.org/10.1111/ter.12014>
- Alcalá, F.J., Martínez-Valderrama, J., Robles-Marín, P., Guerrero, F., Martín-Martín, M., Raffae-lli, G., Tejera de León, J. y Asebrí, L. (2015). A hydrological-economic

- model for sustainable groundwater use in sparse-data drylands: Application to the Amtoudi Oasis in southern Morocco, northern Sahara. *Science of the Total Environment*, 537: 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.062>
- Alcalá, F.J., Martín-Martín, M., Guerrero, F., Martínez-Valderrama, J. y Robles-Marín, P. (2018). A feasible methodology for groundwater resource modelling for sustainable use in sparse-data drylands: Application to the Amtoudi Oasis in the northern Sahara. *Science of the Total Environment*, 630: 1246–1257. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.294>
- Alcalá, F.J., Martínez-Pagán, P., Paz, M.C., Navarro, M., Pérez-Cuevas, J. y Domingo, F. (2021). Combining of MASW and GPR Imaging and Hydrogeological Surveys for the Groundwater Resource Evaluation in a Coastal Urban Area in Southern Spain. *Applied Sciences*, 11: 3154. <https://doi.org/10.3390/app11073154>
- Allam, A.R., Saaf, E.J. y Dawoud, M.A. (2002). Desalination of brackish groundwater in Egypt. *Desalination*, 152: 19–26. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01044-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01044-5)
- Andreu, J.M., Alcalá, F.J., Vallejos, Á. y Pulido-Bosch, A. (2011). Recharge to aquifers in SE Spain: Different approaches and new challenges. *Journal of Arid Environments*, 75: 1262–1270. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.01.011>
- ARWUA (2007). Balance hídrico del acuífero aluvial del río Adra en el paraje de Los Hurtados-Las Checas (Adra, Almería). Informe Técnico. Comunidad de Regantes del Río Adra, Adra.
- Bano, M., Marquis, G., Nivière, B., Maurin, J.C. y Cushing, M. (2000). Investigating alluvial and tectonic features with ground-penetrating radar and analyzing diffractions patterns. *Journal of Applied Geophysics*, 43: 33–41. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00031-2)
- Beres, M. y Haeni, F.P. (1991). Application of ground-penetrating radar methods in hydrogeologic studies. *Ground Water*, 29: 375–386. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00528.x>
- Beven, K. (2007). Towards integrated environmental models of everywhere: Uncertainty, data and modelling as a learning process. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 460–467. <https://doi.org/10.5194/hess-11-460-2007>
- Brown, G.O. (2002). Henry Darcy and the making of a law. *Water Resources Research*, 38: 1106. <https://doi.org/10.1029/2001WR000727>
- CENTER (2007). Evaluación de la Comunidad de Regantes del Canal de San Fernando. Término municipal de Adra (Almería). Informe Técnico. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. pp. 1–161.
- Chen, D. y Chen, H.W. (2013). Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development*, 6: 69–79. <https://doi.org/10.1016/J.ENV-DEV.2013.03.007>
- CSIC (2010). Asesoramiento científico-técnico para el estudio del comportamiento hidrogeológico del terreno en la parcela y en las inmediaciones de los edificios San Andrés III y San Andrés IV, situados en la calle Portón 12 y 14, en la localidad de Adra (Almería). Informe Técnico. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Almería.
- Custodio, E. (2010). Coastal aquifers of Europe: An overview. *Hydrogeology Journal*, 18: 269–280. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0496-1>
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T. y Puma, M.J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543: 700–704. <https://doi.org/10.1038/nature21403>
- DMA (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000. Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 2212/2000. L 327/1–327/32, Bruselas.
- Downward, S.R. y Taylor, R. (2007). An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, southeast Spain. *Journal of Environmental Management*, 82: 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.015>
- García-Jerez, A., Navarro, M., Alcalá, F.J., Luzón, F., Pérez-Ruiz, J.A., Enomoto, T., Vidal, F. y Ocaña, E. (2007). Shallow velocity structure using joint inversion of array and h/v spectral ratio of ambient noise: The case of Mula town (SE of Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: 907–919. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.03.001>
- Goy, J.L. y Zazo, C. (1986). Synthesis of the Quaternary in the Almería littoral neotectonic activity and its morphologic features, western Betics, Spain. *Tectonophysics*, 130: 259–270. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90116-2)
- Herrera, S., Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Espírito-Santo, F., Viterbo, P. y Gutiérrez, J.M. (2019). Iberia01: A new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over Iberia. *Earth System Science Data*, 11: 1947–1956. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1947-2019>
- Hojberg, A.L. y Refsgaard, J.C. (2005). Model uncertainty - parameter uncertainty versus conceptual models. *Water Science & Technology*, 52: 177–186. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0166>
- IECA (2026). Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/ficha.htm?mun=04003>

- IGME (1983). Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, Hoja nº 1057 Adra, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>
- IGME (1998). Atlas Hidrogeológico de Andalucía. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. https://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro110/lib110.htm
- JUNTA (2015). Demarcación hidrográfica de las cuencas mediterráneas andaluzas—Apéndice III: Usos y demandas, Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla. pp. 1–133.
- Lerner, D.N. (2002). Identifying and quantifying urban recharge: A review. *Hydrogeology Journal*, 10: 143–152. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0177-1>
- Licciardello, F., Milani, M., Consoli, S., Pappalardo, N., Barbagallo, S. y Cirelli, G. (2018). Wastewater tertiary treatment options to match reuse standards in agriculture. *Agriculture Water Management*, 210: 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.001>
- Martínez-Pagán, P., Navarro, M., Pérez-Cuevas, J., Alcalá, F.J., García-Jerez, A. y Vidal, F. (2018). Shear-wave velocity structure from MASW and SPAC methods. The case of Adra town, SE Spain. *Near Surface Geophysics*, 16: 356–371. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2018012>
- Morote, Á.F., Olcina, J. y Hernández, M. (2019). The use of non-conventional water resources as a means of adaptation to drought and climate change in Semi-Arid Regions: South-Eastern Spain. *Water*, 11: 93. <https://doi.org/10.3390/w11010093>
- Navarro, M., Vidal, F., Enomoto, T., Alcalá, F.J., García-Jerez, A., Sánchez, F.J. y Abeki, N. (2007). Analysis of the weightiness of site effects on reinforced concrete (RC) building seismic behavior. The Adra town example (SE Spain). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36: 1363–1383. <https://doi.org/10.1002/eqe.685>
- Neal, A. (2004). Ground penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66: 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Park, C.B., Miller, R.D. y Xia, J. (1999). Multi-channel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64: 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Paz, M.C. (2017). Geophysical techniques applied to shallow aquifers characterization. Tesis Doctoral. Instituto Superior Técnico, Universidad de Lisboa, Lisboa. <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/6HgSVVRn-QLX3i1wZKcJDPrf7qAZ4cc7Eti44>
- Paz, M.C., Alcalá, F.J., Carvalho, J.M. y Ribeiro, L. (2017). Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research. *Science of the Total Environment*, 595: 868–885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.210>
- Paz, M.C., Alcalá, F.J., Medeiros, A., Martínez-Pagán, P., Pérez-Cuevas, J. y Ribeiro, L. (2020). Integrated MASW and ERT imaging for geological definition of an unconfined alluvial aquifer sustaining a coastal groundwater-dependent ecosystem in southwest Portugal. *Applied Sciences*, 10: 5905. <https://doi.org/10.3390/app10175905>
- Pulido-Bosch, A., Morales, G. y Benavente, J. (1988). Hidrogeología del delta del río Adra. *Estudios Geológicos*, 44: 429–443. <https://doi.org/10.3989/egcol.88445-6559>
- Pulido-Velazquez, D., Baena-Ruiz, L., Mayor, B., Zorrilla-Miras, P., López-Gunn, E., Gómez-Gómez, J.D., De la Hera-Portillo, A., Collados-Lara, A.J., Mejías Moreno, M., García Aróstegui, J.L. y Alcalá, F.J. (2023). Integrating stakeholders' inputs to co-design climate resilience adaptation measures in Mediterranean areas with conflicts between wetland conservation and intensive agriculture. *Science of the Total Environment*, 870: 161905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161905>
- REDIAM (2025). Mapa de usos del suelo de Andalucía, escala 1:25.000, Red Andaluza de Información Ambiental, Junta de Andalucía, Sevilla. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>
- Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Alcalá, F.J. y Paracuellos, M. (2011). Long-term water monitoring in two Mediterranean lagoons as an indicator of land-use changes and intense precipitation events (Adra, South-eastern Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91: 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.11.003>
- Sabater, S. y Barceló, D. (2010). *Water Scarcity in the Mediterranean. Perspectives Under Global Change*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03971-3>
- Sanz de Galdeano, C. (1997). La Zona Interna Bético-Rifeña. Antecedentes, Unidades Tectónicas, Correlaciones y Bosquejo de Reconstrucción Paleogeográfica. Universidad de Granada, Granada. pp. 1–316.
- Van Dam, R.L. y Schlager, W. (2000). Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*, 47: 435–449. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00304.x>
- Xia, J., Miller, R.D. y Park, C.B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave. *Geophysics*, 64: 691–700. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- Zimmer, M.A., Prasad, M., Mavko, G. y Nur, A. (2007). Seismic velocities of unconsolidated sands: Part 1—Pressure trends from 0.1 to 20 MPa. *Geophysics*, 72: E1–E13. <https://doi.org/10.1190/1.2399459>

NUEVA PROTECCIÓN DEL
YACIMIENTO FENICIO
DEL CERRO DE MONTECRISTO

